پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فوتونیک-مخابرات

عنوان:

مطالعه حالت های درهمتنیده کوانتومی از طریق آنتروپی کوانتومی

استادان راهنما

دکتر مصطفی صحرایی

دکتر رضا خردمند

استاد مشاور

دکتر محمد محمودی

پژوهشگر

بهنام ارژنگ

شهریور ماه ۱۳۹۱

با تمام احترام تقدیم به

پدر و مادر بزرگوارم

تقدیر و تشکر

سپاس خدای عزوجل را که هرچه داریم از اوست.

طی این راه فائق آمدن بر مشکلات و دشواری ها ممکن نبوده است مگر به لطف و یاری کسانی که از وجودشان بهره مند بوده ام و به نوعی در پیشرفت و موفقیت من موثر بوده اند. از این رو بر خود لازم می دانم از این عزیزان کمال تقدیر و تشکر را نمایم:

پدر و مادر عزیزم که در تمامی مراحل زندگی، سختی ها و مشکلات مرا تحمل نموده اند تا شاهد رشد و بالندگی من باشند.

اساتید گرانقدر جناب آقایان دکتر رضا خردمند و دکتر مصطفی صحرایی که در پیشبرد این پایانامه، همواره از راهنمایی های بی دریغ ایشان بهره مند بوده ام.

استاد گرامی جناب آقای دکتر بابک دستاچی که در انجام هرچه بیشتر این پروژه مرا یاری نموده اند.

خواهر و برادر عزیزم به خاطر تمام دلگرمی ها و حمایت هایشان در طول پروژه.

و در نهایت از دوستان و همکلاسی هایم کمال تشکر را دارم.

نام خانوادگی دانشجو: ارژنگ **نام:** بهنام

استادان راهنما: دکتر مصطفی صحرایی، دکتر رضا خردمند **استاد مشاور:** دکتر محمد محمودی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** فوتونیک **گرایش:** مخابرات **دانشگاه:** تبریز

دانشکده: پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی

تاریخ فارغ التحصیلی: شهریور ۱۳۹۱ **تعداد صفحه:** ۱۰۶

کلید واژه ها: درهمتنیدگی کوانتومی، آنتروپی ون نویمن، گسیل‌خودبه خود، سیستم سه ترازی و چهار ترازی، تداخل کوانتومی

چکیده:

هر گاه دو سیستم فیزیکی با یکدیگر برهم کنش داشته باشند، همبستگی کوانتومی بین اجزا این سیستم ممکن است منجر به یک پدیده فیزیکی مهم به نام درهمتنیدگی کوانتومی می شود. این مفهوم را اولین بار توسط انیشتین و همکارانش، پودولسکی و روزن در سال ۱۹۳۵ در مقاله معروف EPR مطرح گردید. درهمتنیدگی کوانتومی یکی از منابع مهم در اطلاعات کوانتومی، محاسبات کوانتومی، انتقال اطلاعات کوانتومی از راه دور و ... است. برای آشکار سازی درهمتنیدگی یک سیستم، ابتدا باید خالص و یا مرکب بودن سیستم را مشخص کنیم. مطالعه کمی میزان درهمتنیدگی یکی از مسائل مهم در زمینه اطلاعات کوانتومی است. هر تابعی که مقدار کمی درهمتنیدگی کوانتومی را مشخص کند به عنوان یک سنجه درهمتنیدگی شناخته می شود. آنتروپی ون- نویمن سنجه (تابعی) است که برای حالت های خالص دو قسمته مورد استفاده قرار می گیرد. سیستم با حالت دو قسمته سیستمی است که بتوان دو حالت کاملا مجزا برای آن در نظر گرفت. در این پایان نامه درهمتنیدگی کوانتومی سیستم های اتمی سه ترازه آبشاری و چهار ترازی جفت Λ و گسیل خود به خودی این سیستم ها مورد بررسی قرار می گیرد و تاثیر عواملی چون گسیل خود به خود، میدان های اعمالی، تداخل کوانتومی و فاز بین میدان های اعمال شده بر درهمتنیدگی اتم- میدان مورد بررسی قرار می گیرد.

فهرست مطالب

مقدمه ۱

فصل اول ۲

مقدمه ۳

۱-۱ بیت کوانتومی ۳

۱-۱-۱ کره بلاخ ۵

۱-۱-۲ انواع نمایش فیزیکی کیوبیت ۸

۱-۲ پارادوکس EPR ۱۳

۱-۳ درهمتنیدگی کوانتومی ۱۰

۱-۴ درهمتنیدگی و حالت های خالص و آمیخته ۱۳

۱-۵ آنتروپی وان نیومن ۲۰

۱-۶ قدرت درهمتنیدگی ۲۳

۱-۷ حالت های بل ۲۳

۱-۸ تبدیلات $LOCC$ ۲۵

۱-۹ ارتباط از راه دور کوانتومی ۲۷

۱-۱۰ رمزنگاری کوانتومی ۳۱

۱-۱۱ ایجاد درهمتنیدگی اتم- فوتون با استفاده از روش گذار بی درو کسری ۳۲

۱-۱۱-۱ استیرپ: ۳۲

۱-۱۱-۲ تولید درهمتنیدگی اتم-فوتون ۳۵

۱-۱۲ درهمتنیدگی فوتون- فوتون ۳۷

۱-۱۲-۱ تولید تک فوتون ۳۷

۱-۱۲-۲ تبدیل نزولی پارامتری ۳۸

۱-۱۲-۳ تولید جفت فوتون در یک کریستال ۴۰

۱-۱۲-۴ تولید فوتون های درهمتنیده در دو کریستال مرکب ۴۱

۱-۱۴ درهمتنیدگی اتم- اتم ۴۳

فصل دوم ۴۹

مقدمه ۵۰

۲-۱ برهمکنش اتم با میدان مغناطیسی ۵۰
۲-۱-۱ هامیلتونی اندرکنش اتم- میدان (نظریه کوانتومی) ۵۱
۲-۱-۲ اندرکنش اتم دو ترازی و میدان تک مد ۵۵
۲-۲ همدوسی اتمی ۵۶
۲-۳ تداخل کوانتومی ۵۷
۲-۳ گسیل خودبخود ۶۰
۲-۳-۱ همدوسی ناشی از گسیل خود به خود ۶۱
۲-۴ آنتروپی کوانتومی معیاری برای درهمتنیدگی کوانتومی ۶۲
۲-۴-۱ جمع پذیر بودن: ۶۳
۲-۴-۲ نا مساوی اراکی- لیب ۶۳
۲-۵ ماتریس چگالی اتم دو ترازی ۶۵
۲-۵-۱ معادلات حرکت برای ماتریس چگالی ۶۶
۲-۵-۲ اتم دو ترازی ۶۷
۲-۵-۳ بررسی درهمتنیدگی در حالت پایا ۷۰
۲-۶ معادلات ماتریس چگالی یک سیستم چهار ترازی جفت Λ ۷۱
۲-۷ معادلات ماتریس چگالی یک سیستم اتمی سه ترازه آبشاری ۷۷
فصل سوم ۸۱
مقدمه ۸۲
۳-۱ درهمتنیدگی اتم- میدان یک سیستم چهار ترازی جفت Λ ۸۲
۳-۲ درهمتنیدگی اتم- میدان یک سیستم سه ترازی آبشاری ۹۰
نتایج ۹۷
پیشنهادات: ۹۹
منابع ۱۰۰

فهرست شکل ها

شکل ۱-۱ نمایش هندسی یک ۶

شکل ۱-۲ کره بلاخ مربوط به اسپین $\frac{1}{2}$ ۷

شکل ۱-۳ کره بلاخ مربوط به قطبش فوتون ۸

شکل ۱-۴ کره بلاخ مربوط به اتم دو ترازی ۸

جدول ۱-۱ انواع کیوبیت فیزیکی ۹

شکل ۱-۵ نمایش آزمایش ذهنی EPR، تعیین اسپین ذره اول در راستای Z ۱۲

شکل ۱-۶ نمایش آزمایش ذهنی EPR، تعیین اسپین ذره دوم در راستای X ۱۲

شکل ۱-۷ چگونگی ارتباط از راه دور کوانتومی و انتقال اطلاعات ۳۰

شکل ۱-۸ اتم سه ترازی Λ ۳۳

شکل ۱-۹ (الف) تالس های پمپ و استوکس. (ب) نمودار انتقال بی درو جمعیت ۳۴

شکل ۱-۱۰ الگوی جفت شدگی سیستم اتم- کاواک- لیزر با تشدید دو فوتونی ۳۶

شکل ۱۰-۱۱ تولید جفت فوتون در گذار یک اتم آبشاری. فوتون ها توسط آشکارسازهای D و T آشکارسازی می شوند ۳۷

شکل ۱-۱۲ کریستال PDC، با لیزر به طول موج $405nm$ نور دهی شده. ابعاد کریستال عبارت اند از $5mm \times 5mm \times 3mm$ ۳۸

شکل ۱-۱۳ چیدمان فوتون های پیشگام با فلورسانس پارامتریک (PDC) ۳۹

شکل ۱-۱۴ شکل هندسی گسیل PDC و حلقه PDC ۴۰

شکل ۱- ۱۵ گسیل PDC با چرخاندن کریستال ۴۱

شکل ۱-۱۶ ترکیب دو کریستال با محورهای اپتیکی عمود بر هم. با لیزر دارای قطبش 45° ۴۲

شکل ۱-۱۷دستگاه PDC برای تولید درهمتنیدگی، ترکیب دو کریستال ۴۲

شکل ۱-۱۸ حلقه ناشی از گسیل PDC کریستال اول، حلقه ناشی از گسیل PDC کریستال دوم ، حلقه ناشی از گسیل همزمان دو کریستال ۴۲

شکل ۱-۱۹ بعد از چرخش کریستال ها و هم پوشانی حلقه های گسیل PDC ۴۳

فهرست شکل ها

شکل ۱-۲۰ شکل ساختار اتمی ، چیدمان تجربی، دو اتم جدا از هم که در کاواک های A و B قرار دارند.....۴۵

شکل ۲- ۱آرایش سیستم های اتمی Λ و V شکل ۵۹

شکل ۲- ۲شکل سیستم اتمی چهار ترازی جفت Λ. سیستم توسط چهار میدان کنترل می شود.....۷۱

شکل ۲-۳سیستم سه ترازه آبشاری که توسط دو میدان قوی تزویج کننده تحریک شده است.پیکربندی قطبش میدان و گشتاور دوقطبی الکتریکی برای تحریک ترازهای نزدیک به هم ۷۸

شکل۳ -۱ تحول زمانی آنتروپی کوانتومی برای γt نرمالیز شده ۸۵

شکل۳-۲ تحول زمانی آنتروپی کوانتومی برای γt نرمالیز شده و شدت های متفاوت میدان ۸۶

شکل۳-۳ تاثیر تداخل کوانتومی ناشی از گسیل خود به خود. مقادیر مختلف تداخل در شکل نمایش داده شده است.....۸۷

شکل۳ -۴ آنتروپی کوانتومی در حالت پایا نسبت به $\Delta\phi$ ،$\eta = 0, \Delta\varphi = 0$ و $\Delta\varphi = \pi$ ۸۸

شکل۳ -۵ آنتروپی کوانتومی در حالت پایا نسبت به $\Delta\phi$ ، $\eta = 1, \Delta\varphi = 0$ و $\Delta\varphi = \pi$ ۸۹

شکل۳-۶ آنتروپی کوانتومی در حالت پایا نسبت به $\Delta\phi$ ، $\eta = 1$ و $\eta = 0$ ۹۰

شکل ۳-۷ وابستگی زمانی آنتروپی برای مقادیر مختلف فاز مربوط به میدان‌ها.....۹۴

شکل ۳ -۸ آنتروپی کوانتومی حالت پایا نسبت به $\Delta\varphi$ برای $\eta = 0$ و $\eta = 0.99$.....۹۵

شکل۳-۹ آنتروپی کوانتومی را بر حسب تداخل η و اختلاف فاز $\Delta\phi$.....۹۶

شکل۳-۱۰ آنتروپی کوانتومی بر حسب تغییرات میدان Ω_p.....۹۷

مقدمه

مطالعه درهمتنیدگی کوانتومی در سال های اخیر توجه پژوهشگران زیادی را به خود جلب کرده است. درهمتنیدگی کوانتومی در فرآیندهای اطلاعات کوانتومی، محاسبات کوانتومی، انتقال از راه دور، ارتباطات، رمزنگاری و کدگذاری فشرده و... کاربرد وسیعی پیدا کرده است[۱و۲].

تعاریف متنوعی برای درهمتنیدگی وجود دارد، در واقع هر شخصی بر اساس دیدگاه و نوع برخوردی که با درهمتنیدگی داشته تعبیر مختلفی برای آن ارائه داده است. ولی آنچه در تمام این تعبیر یکسان است این واقعیت است که درهمتنیدگی می تواند به عنوان همبستگی بین زیر سیستم های مجزایی تعبیر شود. در واقع می توان گفت وقتی دو سیستم فیزیکی با هم برهمکنش دارند، همبستگی خاصی از ماهیت کوانتومی بین آن دو ایجاد می شود که حتی وقتی برهمکنش را قطع و دو سیستم را از هم جدا می کنیم باز هم همبستگی باقی می ماند. اگر یک اندازه گیری بر روی سیستم اول انجام شود حالتش عوض می شود(به حالتی می رود که ویژه حالت مشاهده پذیر باشد) و حالت سیستم دوم بلافاصله دچار تغییر می شود. عامل انجام این کنش از راه دور همبستگی کوانتومی و غیر موضعی است که به عنوان درهمتنیدگی شناخته می شود. این پدیده غیره کلاسیکی اولین بار در سال ۱۹۳۵ توسط انیشتین، پدولسکی و رزن در مقاله معروف EPR معرفی شد[۳]. برای آشکار سازی درهمتنیدگی، خالص یا مرکب بودن سیستم بسیار مهم است. شرودینگر اولین کسی بود که به ویژگی های غیر کلاسیکی آنتروپی در حالت های درهمتنیده پی برد. آنتروپی میزان عدم اطلاعات یا فقدان اطلاعات ما از سیستم را محاسبه می کند. اطلاعات ما از کل سیستم منزوی همیشه کامل است بنابراین آنتروپی صفر است. ولی در مورد حالت های درهمتنیده هیچ گونه اطلاعاتی از زیر سیستم ها نداریم (در بیشینه درهمتنیدگی) پس آنتروپی (عدم اطلاعات) زیر سیستم ها غیر صفر است[۴].

فصل اول

بررسی منابع

مقدمه

طرح ارتباطات، محاسبات و شبکه های کوانتومی از طریق جفت بیت های کوانتومی درهمتنیده دور از هم، اولین قدم به سمت تکنولوژی هایی از جمله انتقال امن پیام و محاسبات کوانتومی است. یکی از مشکلات این امر، کاهش نمایی نرخ ارتباطات کوانتومی بر اثر اتلاف در فیبرهای نوری است. برای غلبه بر این مسئله یکی از پیشنهادات مورد نیاز، تکرار کننده های کوانتومی برای غلبه بر کاهش نمایی نرخ ارتباطات کوانتومی بر اثر اتلاف در فیبرهای نوری است. اگر چه تکرارکننده های کوانتومی به طول عمر عناصر حافظه خود وابستگی دارند. به این منظور لازم است حالات درهمتنیده تولید، خالص سازی و در نهایت در کل مسیر بسط داده شود. اجرای چنین طرحی اولین بار توسط دوان، لاکین، سیراک و زولر با استفاده از فیبرهای نوری، مجموعه اتمی و آشکارسازهای تک فوتونی عملی شده است [۵].

در این فصل به معرفی کلی درهمتنیدگی و آنتروپی ون نویمن خواهیم پرداخت. در ادامه به یکی از کاربردهای درهمتنیدگی که به آن انتقال اطلاعات از راه دور گفته می شود، می پردازیم و در نهایت یک روش تولید درهمتنیدگی اتم- فوتون را بررسی می کنیم.

۱-۱ بیت کوانتومی [۱]

کوانتوم بیت یا کیوبیت واحد اطلاعات کوانتومی است [۶]. این اطلاعات توسط بردار حالت در یک سیستم کوانتومی دو ترازی توصیف می شود. بعلاوه یک کیوبیت باید خواص زیر را داشته باشد:

[۱] Qubite

۱) مقیاس پذیری

۲) قابلیت مقدار دهی

۳) قابلیت اندازه گیری

یک بیت واحد اساسی در اطلاعات کامپیوتری است. یک بیت همیشه صفر و یا یک است که در قیاس با آن می توان یک سوئیچ نوری را تصور کردکه مثلا صفر با حالت خاموش و یک با حالت روشن بیان می شود. علیرغم شباهت های بیت و کیوبیت، این دو تفاوت های اساسی نیز دارند؛ یک بیت باید صفر و یا یک باشد ولی یک کیوبیت می تواند صفر و یک و یا برهم نهی از این دو باشد.

یک کیوبیت در حالت های پایه اندازه گیری می شود و برای نشان دادن آنها از حالت های کوانتومی در نمایش دیراک (براکت) استفاده می کنیم. پس دو حالت را می توان به صورت $|1\rangle$ و $|0\rangle$ نوشت. یک کیوبیت خالص برهم نهی خطی این دو حالت است:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \qquad (۱-۱)$$

که α و β دامنه های احتمال هستند. با اندازه گیری این حالت در پایه استاندارد، احتمال نتیجه $|0\rangle$ برابر $|\alpha|^2$ و احتمال نتیجه $|1\rangle$ برابر $|\beta|^2$ می باشد.

از طرفی معادله زیر باید برقرار باشد:

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1, \qquad (۱-۲)$$

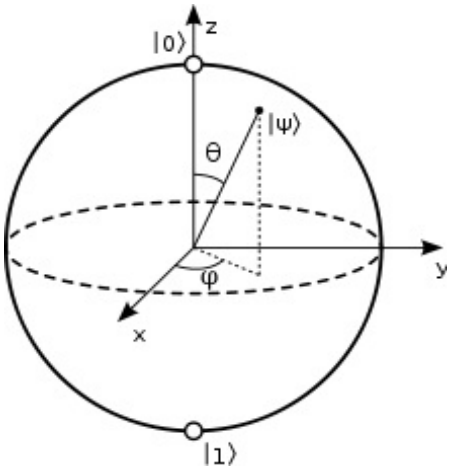
یک تمایز مهم میان یک کیوبیت و یک بیت کلاسیکی در آن است که کیوبیت چندگانه می تواند با درهمتنیدگی کوانتومی نمایش داده شود. برای مثال، دو کیوبیت درهمتنیده در حالت بل به این صورت نشان داده می شوند:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle+|11\rangle), \qquad (۳-۱)$$

در این حالت که برهم نهی یکسان نامیده می شود، احتمال $\frac{1}{2}$ برای اندازه گیری هر یک از حالت های $|00\rangle$ و $|11\rangle$ وجود دارد. درهمتنیدگی به حالت های چندگانه امکان می دهد که در یک زمان بیشتر از یک مقدار داشته باشند.

۱-۱-۱ کره بلاخ

برای فهم بهتر این موضوع می توان یک کیوبیت را به صورت هندسی نمایش داد[۷]:



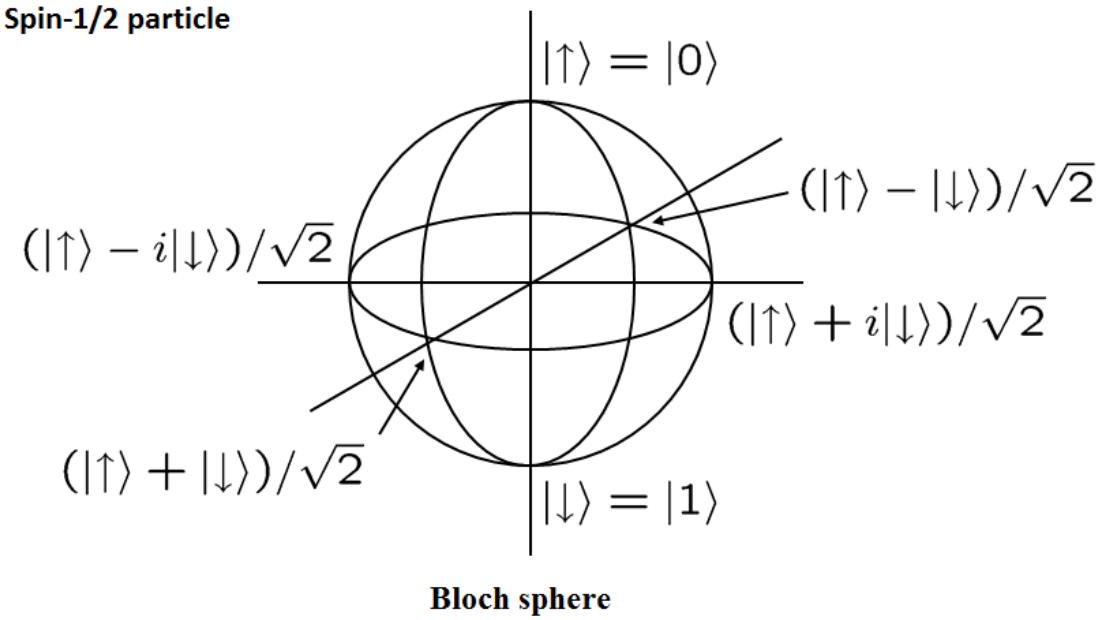
شکل ۱-۱ نمایش هندسی یک کیوبیت

از آنجاییکه $|\alpha|^2+|\beta|^2=1$ برقرار، می توان معادله (۱-۱) را به فرم زیر نوشت:

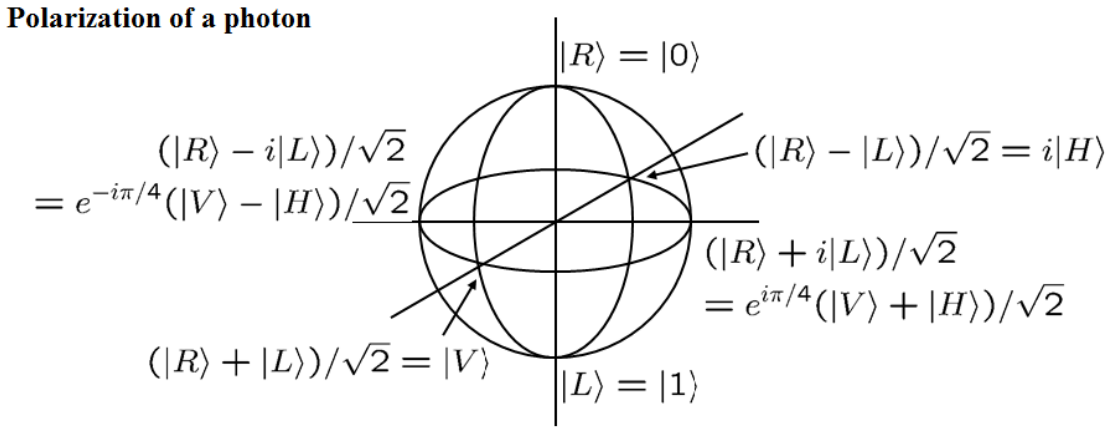
$$|\psi\rangle = e^{i\gamma}(\cos(\frac{\theta}{2})|0\rangle + e^{i\varphi}\sin(\frac{\theta}{2})|1\rangle), \qquad (۴-۱)$$

که θو φ نشان دهنده یک نقطه در فضای سه بعدی کروی اند که این کره "کره بلاخ" نامیده می شود. در این کره حالت $|\psi\rangle$ نشان دهنده حالت یک تک کیوبیت است[۲]. یک بیت کلاسیک فقط در راستای محور z می تواند قرار بگیرد یعنی در مکان هایی از کره بلاخ که با $|0\rangle$و $|1\rangle$ نشان داده شده است و در جای دیگری روی کره نمی تواند قرار بگیرد. اما طبق روابط (۱-۱) و (۱-۳)، یک کیوبیت می تواند در برهم نهی از دو حالت $|0\rangle$ و $|1\rangle$ باشد.

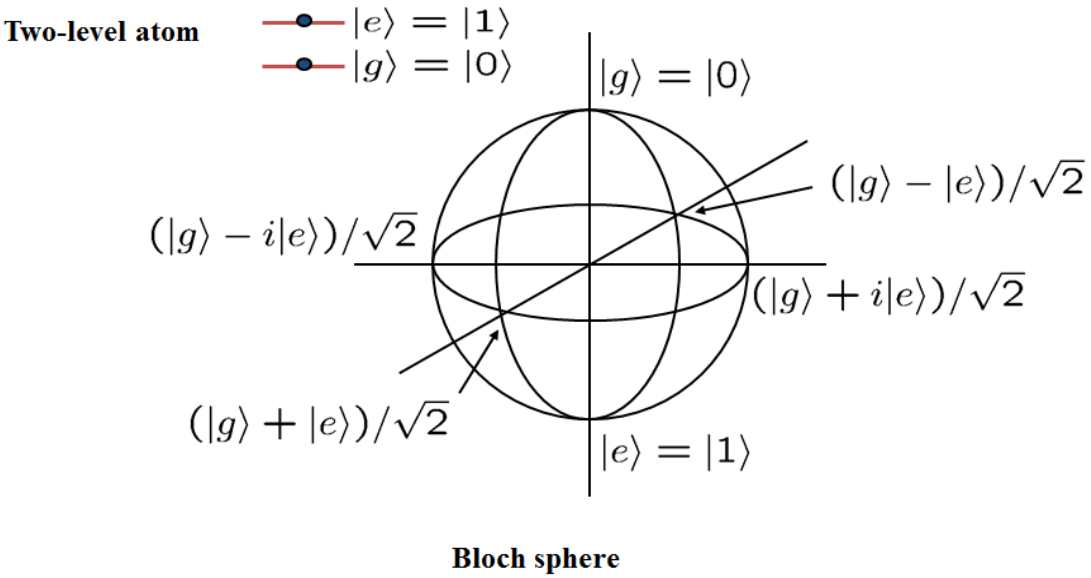
در زیر چند نمونه کره بلاخ را می توان مشاهده کرد که این کره های بلاخ مربوط به سیستم های فیزیکی می باشند:



شکل ۱-۲ کره بلاخ مربوط به ذره با اسپین $\frac{1}{2}$



شکل ۱-۳ کره بلاخ مربوط به قطبش فوتون



شکل ۱-۴ کره بلاخ مربوط به اتم دو ترازی

۱-۱-۲ انواع نمایش فیزیکی کیوبیت

هر سیستم دو ترازی می تواند به عنوان یک کیوبیت در نظر گرفته شود. حتی سیستم های چند ترازی هم به شرطی که دارای دو حالت کاملا مجزا باشند، قابل استفاده هستند(مثلا حالت پایه و اولین حالت برانگیخته اتم). در طراحی یک کامپیوتر کوانتومی از ترکیبات گوناگون کیوبیت ها می توان بهره گرفت[۷].

Physical support	**Name**	**Information support**	$\|0\rangle$	$\|1\rangle$
Photon	Polarization encoding	Polarization of light	Horizontal	Vertical
	Number of photons	Fock state	Vacuum	Single photon state
	Time-bin encoding	Time of arrival	Early	Late
Coherent state of light	Squeezed light	Quadrature	Amplitude-squeezed state	Phase-squeezed state
Electrons	Electronic spin	Spin	Up	Down
	Electron number	Charge	No electron	One electron
Nucleus	Nuclear spin addressed through NMR	Spin	Up	Down
Optical lattices	Atomic spin	Spin	Up	Down
Josephson junction	Superconducting charge qubit	Charge	Uncharged superconducting island (Q=۰)	Charged superconducting island (Q=۲e, one extra Cooper pair)
	Superconducting flux qubit	Current	Clockwise current	Counterclockwise current
	Superconducting phase qubit	Energy	Ground state	First excited state
Singly charged quantum dot pair	Electron localization	Charge	Electron on left dot	Electron on right dot
Quantum dot	Dot spin	Spin	Down	Up

جدول (۱-۱) انواع کیوبیت فیزیکی

۱-۲ درهمتنیدگی کوانتومی

در سال های اخیر توجه زیادی به درهمتنیدگی کوانتومی جلب شده است. درهمتنیدگی کوانتومی در فرآیندهای اطلاعات کوانتومی، محاسبات کوانتومی، انتقال از راه دور، ارتباطات، رمزنگاری و کدگذاری فشرده و... کاربرد وسیعی پیدا کرده است. در حقیقت آینده عصر تکنولوژی بر اساس درهمتنیدگی قرار دارد. با بررسی های صورت گرفته در مقیاس اتمی پدیده های ناملموسی رخ می دهد که همتای کلاسیکی ندارد و در حقیقت به جای یک دنیای قابل کنترل باید از احتمال و نامشخص بودن صحبت کنیم. در فرستادن اطلاعات مسئله امنیت بازگرداندن و در جای خود گذاشتن اطلاعات بسیار مهم است که به خاطر درهمتنیدگی این امنیت به صورت بسیار خوبی اما نه به طور کامل حفظ شده است.

دانشمندان تعریف متنوعی برای پدیده درهمتنیدگی بیان داشته اند. بل[۱] درهمتنیدگی کوانتومی را یک نوع همبستگی معرفی می کند که قوی تر از هرگونه همبستگی کلاسیکی است. بنت[۲] درهمتنیدگی را به عنوان منبعی می داند که ارسال اطلاعات کوانتومی را برای ما قادر می سازد. مطابق تعریف شور[۳]، درهمتنیدگی یک ساختار است که اجازه انجام الگوریتم هایی را با سرعت بالاتر می دهد. آنچه در تمام این تعبیر یکسان است این واقعیت است که درهمتنیدگی می تواند به عنوان همبستگی بین زیر سیستم های مجزایی تعبیر شود [۸]. در واقع می توان گفت وقتی دو سیستم فیزیکی با هم برهمکنش دارند، همبستگی خاصی از ماهیت کوانتومی بین آن دو ایجاد می شود که حتی وقتی برهمکنش را قطع و دو سیستم را از هم جدا می کنیم باز هم همبستگی باقی می ماند. اگر یک اندازه گیری بر روی سیستم اول انجام شود حالتش عوض می شود(به حالتی می رود که ویژه

[۱] BEll
[۲] Bennet
[۳] Shor

حالت مشاهده پذیر باشد) و حالت سیستم دوم بلافاصله دچار تغییر می شود. عامل انجام این کنش از راه دور همبستگی کوانتومی و غیر موضعی است که به عنوان درهمتنیدگی شناخته می شود. این پدیده معمولا در زیر سیستم هایی وجود دارد که تنها در گذشته با یکدیگر برهمکنش داشته اند و اکنون هیچ برهم کنشی با هم ندارند. بنابراین اگر دو سیستم در گذشته با یکدیگر برهم کنش داشته اند عموما این امکان وجود ندارد که حالت هر یک از زیر سیستم ها مستقل از دیگری معین نمود.

یک حالت درهمتنیده دو کیوبیتی را در نظر می گیریم، فرض می کنیم که کیوبیت اول دست آلیس و دومی در دست باب است. نام های آلیس و باب به طور معمول در زمینه های رمزنگاری کوانتومی، انتقال از راه دور کوانتومی و... به کار می روند [۹]. این اسامی اولین بار در سال ۱۹۷۸ توسط ران ریوست (Ron Rivest) در مقاله ای مربوط به رمزنگاری کوانتومی استفاده شد. حالت های $|0\rangle$ و $|1\rangle$ را برای نشان دادن ویژه حالت های اسپین در راستای Z به کار می بریم. اگر آلیس روی ذره خود یک اندازه گیری در راستای Z انجام دهد و مقدار صفر به دست آورد، می تواند به طور قطع نتیجه اندازه گیری باب را پیشگویی کند، زیرا باب در صورت اندازه گیری در همین پایه به طور قطع مقدار یک را بدست خواهد آورد. بالعکس اگر آلیس مقدار یک را بدست آورد، می تواند به طور قطع بگوید که باب نتیجه صفر را در اندازه گیری خود دست خواهد آورد. این قدرت پیش بینی نتیجه توسط آلیس حتی در وضعیتی که اندازه گیری های آلیس و باب فاصله فضا گونه با هم دارند نیز برقرار است. از آنجا که دو رویداد با فاصله فضا گونه هیچ گونه رابطه علّی با یکدیگر ندارند، به نظر می رسد که یک نوع اثر غیر موضعی در مکانیک کوانتومی وجود دارد که هیچ نوع سابقه ای در فیزیک کلاسیک ندارد. این پدیده غیره کلاسیکی اولین بار در سال ۱۹۳۵ توسط انیشتین، پدولسکی و رزن[۱]

[۱] Einstein, Podolsky and Rosen